

DOI: 10. 20174/j. JUSE. 2026. 02. 35

基于需风量理论的复杂地下洞室污染物调控研究

邢荣军^{1,2}, 刘奕显^{1,2}, 徐湃^{1,2}, 胡政攀^{1,2}, 朱代强^{1,2}

(1. 重庆交通大学 山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要: 地下洞室具有安全隐蔽、环保节地等优势。然而, 因空间封闭, 施工过程中污染物易积聚。因此, 提高通风系统运行效率, 降低施工期能耗, 是保障施工人员安全及设备正常运行的关键。以某地下洞室工程为对象, 采用理论计算确定洞室需风量, 并制定风机变频调控策略。通过数值模拟软件 Fluent 分析压入式通风条件下, 地下洞室内苯、粉尘污染物在变频前后的浓度变化规律, 并结合现场环境质量监测数据进行对比验证。结果表明: 持续通风下, 变频前后各洞室纵断面污染物浓度先逐渐增长后并趋于稳定, 污染物产生与排出量逐渐守恒, 人员呼吸高度处污染物浓度低于限值, 验证了变频策略的有效性; 通过建立通风动态调控系统, 实现了施工现场风量调控。当轴流风机保持 25% 左右节电率, 射流风机保持 60% 以上的节电率时, 洞室污染物浓度仍在限值范围内, 在保证施工人员安全的同时, 降低了能源消耗。研究成果可为复杂地下洞室多工作面施工通风设计提供参考。

关键词: 复杂地下洞室; 施工通风; 动态调控; 数值模拟; 污染物浓度

中图分类号: U459.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)02-0732-10

Research on Control of Pollutants in Complex Underground Caverns Based on Required Air Volume Theory

Xing Rongjun^{1,2}, Liu Yixian^{1,2}, Xu Pai^{1,2}, Hu Zhengpan^{1,2}, Zhu Daiqiang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: The underground caverns has the advantages of safe concealment, environmental protection, and land saving. However, due to its enclosed space, pollutants are easily accumulated during construction. Consequently, improving the operation efficiency of the ventilation system and reducing energy consumption during the construction period are the keys to ensuring the safety of personnel and the normal operation of equipment. Taking an underground cavern project as the object, a theoretical calculation is used to determine the frequency conversion control strategy of the cavern fan, and numerical simulation (Fluent) is used to analyze the concentration changes of benzene and dust pollutants in the underground cavern before and after frequency conversion under the pressure ventilation condition, the field environmental quality monitoring data are compared and validated. The results show that: the concentration of pollutants on the longitudinal section of each cavern before and after continuous ventilation frequency conversion increases gradually and then stabilizes. The gradual conservation of pollutant generation and emission rates, with pollutant concentrations at breathing height below the limit values, verifies the effectiveness of the variable frequency strategy. In the construction site, the ventilation dynamic control

收稿日期: 2025-07-11 (修改稿)

作者简介: 邢荣军 (1981—), 男, 陕西渭南人, 博士, 副教授, 主要从事隧道及地下工程领域的教学与科研工作。

E-mail: xingrong-12@163.com

通讯作者: 徐湃 (1985—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 副教授, 主要从事隧道及地下工程领域的教学与科研工作。

E-mail: xu_pai@126.com

基金项目: 重庆市自然科学基金 (2024NSCQ-MSX3605); 企、事业委托项目 (E1220413)

system is established to realize the variable air volume control. When the axial flow fan maintains an energy-saving rate of around 25% and the jet fan maintains an energy-saving rate of over 60%, the pollutant concentration in the cavern remains within the limit range. This not only ensures the safety of construction personnel but also reduces energy consumption. The study can provide reference for the ventilation frequency conversion design of multi-face construction in underground caverns.

Keywords: complex underground cavern; construction ventilation; dynamic control; numerical simulation; pollutant concentration

0 引言

近年来,地下洞室因其地理位置及结构形式的特殊性,逐渐成为前沿科学研究的理想场所,促使对其施工标准提出了更高要求。在施工过程中,洞室内会产生大量的苯、粉尘等有毒有害物质^[1-2]。施工人员长期暴露于污染物中,将对其呼吸系统造成损害,严重时可危及生命^[3-4]。因此,为保障作业人员的生命健康安全及施工效率,通风作为改善作业环境的关键措施,成为地下洞室施工过程中的重要环节。

随着人工智能等现代信息技术的发展,变频技术被广泛应用于通风工程中,国内外学者针对此开展了大量研究。Liu等^[5]设计了一种基于径向基函数神经网络的隧道通风智能控制系统,实现了风机频率的自动调节与智能控制;任涛等^[6]利用人工神经网络设计了自适应通风控制系统,可根据隧道环境需求调节供风量;Wang等^[7]提出了一种扰动补偿的通风控制方法,提高了通风系统对外界因素扰动的抵抗性能,保证了通风性能的稳定;An等^[8]建立了一套智能闭环通风控制系统,并基于深度确定性策略梯度强化调节算法,实现了复杂隧道群施工通风的智能化调控及管理能力;邵春等^[9]研发了一套隧道风机智慧控制系统,通过PLC可编程功能,实现了风机运行数量及功率的实时调控;Wu等^[10]采用人工神经网络(NN)单元控制通风,将污染物浓度调节到所需水平,实现了更好的调节性能并大幅度降低能耗。

综上所述,为确保污染物浓度在规定限值范围内,并有效降低通风设备能耗,当前研究主要采用变频技术实时调控风机频率,且研究对象多为隧道类线形结构。复杂地下洞室作为具有洞室数量多、连接隧道纵横交错、空间跨度大等特点的构筑物,污染物极易在洞室弯曲、分支和连接处积聚。导致了当污染物浓度降低时,保持恒定风机频率运行会造成能耗问题的进一步加剧。为保证施工人员安全,并且在机械正常运转的同时实现节能。本文依

托某地下洞室工程,针对污染物浓度调控及风机变频策略展开研究,研究成果对于复杂地下洞室多工作面施工变频通风设计,实现低碳节能具有指导意义。

1 工程概况

本工程位于某隧道中部地下2400m处,整个洞室占地面积超4万m²,容积约30万m³,采用压入式通风方式。洞室由4个试验大厅、4条服务隧道、3条连接隧道、2条辅助隧道组成。洞室内环境湿度大,连接多。洞室平面如图1所示,具体参数如表1所示。

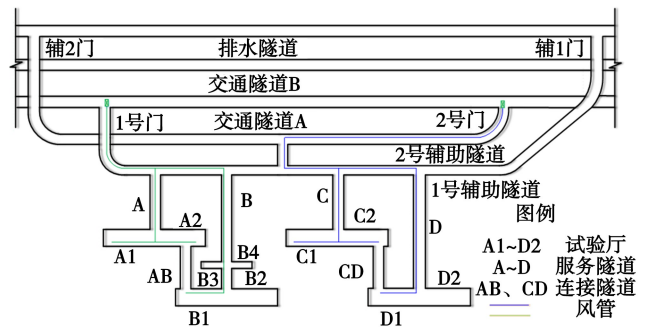


图1 地下洞室平面示意图

Fig. 1 Plan diagram of underground caverns

表1 各洞室断面面积及长度

Table 1 Section area and length of each cavern

区域	断面面积/m ³	洞室长度/m
试验大厅(A1、A2、B1、C1、C2、D1)	174.93	65
服务隧道(A、C)	46.61	70
服务隧道(B、D)	46.61	145
连接隧道(AB、CD)	23.81	60
中间连接道	44.28	40
辅助隧道(1号)	62.35	1 015
辅助隧道(2号)	62.35	940

结合洞室结构和工程施工特点,将作业区段划

分为左右两个工区,左工区包括 A、B 试验大厅及其附属横通道;右工区包括 C、D 试验大厅及其附属横通道。左右两侧工区分为供、排风区,左侧工区的供风区为 A、B 试验大厅、排风区为 A、B 服务隧道以及辅助隧道;右侧工区的供风区为 C、D 试验大厅、排风区为 C、D 服务隧道以及辅助隧道。设置两套独立的新风系统,分别向 A、B、C、D 试验大厅供给新风,新风于作业段与污风完成置换,沿各服务隧道进入 1 号辅助隧道,最后污风经由 1 号辅助隧道排出洞外。

2 施工通风设计方法

2.1 需风量确定

洞内施工需风量主要考虑施工作业人员的呼吸、爆破后有害气体的稀释、最低允许风速、施工过程中内燃机械设备总功率 4 种因素^[11]。此外,洞室内进行喷射混凝土以及装饰粉刷等施工环节时会产生有害物质,扩散到空气中使施工人员出现头晕、乏力等慢性中毒症状。因此,还需考虑稀释此类物质的需风量计算,计算方法参考《工业通风》^[12]和《现代隧道施工通风技术》^[13]。本文以苯和粉尘为例进行污染物浓度验证,二者浓度限值分别为 6 mg/m³ 和 2 mg/m³^[14]。由于左右工区洞室尺寸与布局完全相同,故以左侧工区为例进行需风量计算,计算方法与结果如表 2 所示。

表 2 施工需风量计算方法与结果

Table 2 Calculation method and results of air volume required for construction

需风量计算	计算方法	计算结果/ (m ³ · min ⁻¹)
按洞内最多施工人数计算	$Q_1 = k_1 \times m \times q$	837
按稀释内燃机废气计算	$Q_2 = k_2 \times g \times \sum (N_i)$	936
按洞内最小允许风速计算	$Q_3 = 60 \times S \times v$	1 521
按粉尘释放量计算	$Q_4 = M/n$	468
按稀释有害有机物计算	$Q_5 = K(x/y)$	938
供风量	$Q_{供} = \eta \times Q_{需}$	1 678

注: k_1 为风量储备系数; m 为洞室内最多同时作业人数,人; q 为洞室内作业人员每人每分钟所需风量,m³/(min · 人); k_2 为内燃机功率利用率; g 为内燃机单位功率每分钟的需风量,m³/(min · kw); N_i 为内燃机额定功率,kw; S 为断面面积,m²; v 为最低允许风速,全断面开挖不小于 0.15 m/s; M 为作业面呼吸性粉尘生成量,mg/min; n 为允许含尘量,mg/m³; K 为安全系数; x 为有害有机物的散发量,mg/min; y 为有害有机物的允许浓度,mg/m³;需风量取 $Q_1 \sim Q_5$ 中的计算最大值; $Q_{供}$ 为供风量,m³/min; η 为漏风系数。

2.2 供/排风区风机频率计算方法

变频调速技术是通过变频器转换,将电源由固定电压、频率转换为可调电压、频率的交流供电方式。电动机转速与频率的关系为:

$$n = 60f(1 - s)/p \quad (1)$$

式中: n 为电动机转速,r/min; f 为输入电源频率,Hz; p 为电动机磁极对数; s 为电动机转差率。当频率 f 在 0~50 Hz 的范围内变化时,电机转速的可调节范围随着输入频率调节范围变化而变化。

参考电机学和流体力学原理,风机运行工况参数与输入电流频率之间的关系^[15]为:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{f_1}{f_2}; \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2; \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^3 \quad (2)$$

式中: Q 为风机风量,m³/s; H 为风机风压,Pa; P 为风机功率,kW。

依据式(2),在测定风机某电源频率下的一组风量、风压、功率后,可计算得到任意频率下该风机的风量、风压、功率,各参数关系如表 3 所示。

表 3 频率、转速、流量、功率以及节电率对应关系

Table 3 The corresponding relationship between frequency, rotational speed, flow rate, power and power saving rate

频率 f /Hz	转速 N /%	流量 Q /%	功率 P /%	节电率/%
50	100	100	100	0
45	90	90	72.9	27.1
40	80	80	51.2	48.8
35	70	70	34.3	65.7
30	60	60	21.6	78.4
25	50	50	12.5	87.5
20	40	40	6.4	93.6

(1) 供风区轴流风机频率

对于存在 n 个类似布局的洞室,轴流风机同时为 n 个洞室并联供风。 n 个洞室并联平面布局如图 2 所示,轴流风机功率可通过求解通风系统的总风阻推导可得,推导过程如下:

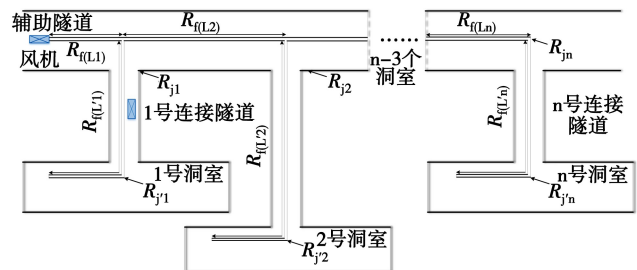


图 2 n 个洞室并联平面布局

Fig. 2 Layout of n parallel caverns

由并联关系可知,风阻 $R_{jL'n-1}$ 、 $R_{j'n-1}$ 、 R_{jn-1} 之和与 $R_{jL'n}$ 、 $R_{j'n}$ 、 R_{jn} 、 R_{jLn} 之和并联,其并联风阻为:

$$R_{s(n-1)} = 1 / \left(\sqrt{\frac{1}{R_{jL'n} + R_{j'n} + R_{jn} + R_{jLn}}} + \sqrt{\frac{1}{R_{jL'n-1} + R_{j'n-1} + R_{jn-1}}} \right)^2 \quad (3)$$

式中: R_s 为通风风管总风阻; R_f 为沿程阻力; R_j 为局部阻力。

令 $R_{s(n)} = R_{L'n} + R_{j'n} + R_{jn}$, 可得并联风阻通式为:

$$R_{s(i-1)} = 1 / \left(\sqrt{\frac{1}{R_{s(i)} + R_{fLi}}} + \sqrt{\frac{1}{R_{jL'i-1} + R_{j'i-1} + R_{ji-1}}} \right)^2 \quad (i = 2, 3 \cdots n) \quad (4)$$

经过迭代,最终可得到通风风管总风阻为:

$$R_s = R_{s1} + R_{fL1} \quad (5)$$

风机并联通风所需功率如式(6)所示。

$$W = (R_s Q^2 + 0.5 \rho v^2) Q K / \eta \quad (6)$$

式中: R_s 为通风风管总风阻; Q 为风机所提供的风量, m^3/s ; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; v 为管道断面平均流速, m/s ; K 为风机功率的储备系数; η 为风机的工作效率。

根据各洞室风管出口风量与支路风阻,可计算出 n 个洞室并联时各洞室的分配风量为:

$$Q_i = \prod_{m=2}^i \sqrt{\frac{R_{s(m-1)}}{R_{sm} + R_{Lm}}} \cdot Q \quad (i = n) \quad (7)$$

式中: Q_i 为第 i 个支路分配的风量。

综上可知,当风机输出风量发生变化时,各洞室风管出口风量也随之等比例变化。

根据表 3 可得风机频率与输出风量间的函数关系为:

$$Q = 0.02 \cdot f \cdot Q_m \quad (8)$$

式中: Q_m 为风机满频运行时提供的风量。

由此,可将式(7)转化为各洞室供风量与电源输入频率之间的关系:

$$Q_i = 0.02 \prod_{m=2}^i \sqrt{\frac{R_{s(m-1)}}{R_{sm} + R_{Lm}}} \cdot f \cdot Q_m \quad (i = n) \quad (9)$$

式(8)的通式为 $Q_i = k_i \cdot f \cdot Q_m$, 各洞室风量 Q_i 与风机频率 f 存在等比线性规律,设比例系数为 k_i ,即第 i 个洞室的常数项系数,其通式可转换为:

$$f_i = Q'_i / (k_i \cdot Q_m) \quad (10)$$

以某洞室 i 风量调节为例,当其初始风量 Q_i , 风机工作频率为 f ,若新风需求发生变化,需要将该分支风量调节至 Q'_i 。利用式(10)计算出满足调

风需求的风机频率 f_i ,取各洞室频率计算最大值作为风机的运行频率 f_{work} ,如式(11)所示,从而实现供风区轴流风机变频调节:

$$f_{work} = \max\{f_1, f_2, \cdots, f_n\} \quad (11)$$

(2) 排风区射流风机频率

排风区的射流风机主要起到推动风流,提供升压力的作用,克服风流在洞室流动过程中遇到的阻力。洞室配置的射流风机的升压力应大于阻力,射流风机升压力计算式为:

$$\Delta p_j = \rho \cdot v_j^2 \cdot \frac{A_j}{A_r} \cdot \left(1 - \frac{v_r}{v_j}\right) \cdot \eta \quad (12)$$

式中: Δp_j 为单台射流风机升压力, Pa; v_j 为射流风机出口风速, m/s ; v_r 为洞室断面风速, m/s ; A_j 为射流风机出口面积, m^2 ; A_r 为洞断面面积, m^2 ; η 为射流风机位置摩阻损失折减系数。

根据质量守恒定律,供风区中新风流入量等于排风区中流出风量。当洞室中供风量变化时,排风区断面风速改变,阻力随之发生变化,此时可通过调节射流风机电源输入频率,改变升压力,进而降低能耗。

令射流风机提供的升压力等于风流流程中的阻力,可建立等式:

$$\rho \cdot v_j^2 \cdot \frac{A_j}{A_r} \cdot \left(1 - \frac{v_r}{v_j}\right) \cdot \eta = \left(1 + \zeta + \lambda \cdot \frac{L}{D_r}\right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2 \quad (13)$$

根据式(13)可得各洞室射流风机风速与风量间的函数关系,如式(14)所示,并通过计算可得洞室风量,明确射流风机所需的运行风速,从而指导射流风机变频。

$$v_{j(i)}^2 - v_{j(i)} \frac{Q_i}{A_r} = \frac{1}{2\eta \cdot A_r \cdot A_j} \left(1 + \zeta + \lambda \cdot \frac{L}{D_r}\right) \cdot Q_i^2 \quad (14)$$

2.3 风机变频调速计算结果

以左侧工区为例,根据式(7)计算可得到 A、B 试验大厅各自分配的风量为:

$$Q_A = 0.57Q, Q_B = 0.43Q \quad (15)$$

由于 A 试验大厅两侧供风,出口风量分别占 A 试验大厅风量的 1/2。本工程选用的轴流风机型号为 SDF(B)_No11,满频工作的输出风量为 $33.1 m^3/s$,根据式(8)可得左侧工区各风管出口风量与电源输入频率的关系为:

$$Q_{A左} = 0.189f, Q_{A右} = 0.189f, Q_{B左} = 0.285f \quad (16)$$

由于洞内环境复杂多变,将风量计算值作为施

工期最小供风量,洞室施工时不得低于理论计算值。

结合2.1节中苯和粉尘的浓度限值,本文考虑污染物的安全冗余系数,以污染物浓度限值的80%为调节阈值,即苯和粉尘的调节阈值分别为 4.8 mg/m^3 、 1.6 mg/m^3 。当各洞室中监测值低于阈值时,保持理论计算值供风,当超过或等于此值,则根据(17)计算调节风量^[16]:

$$Q_{\text{调}} = (c/c_0) Q_0 \quad (17)$$

式中: $Q_{\text{调}}$ 表示各分支污染物浓度超过阈值应调节的风量, m^3/s ; c 表示传感器监测的污染物浓度, mg/m^3 ; c_0 表示污染物阈值, mg/m^3 ; Q_0 表示各分支理论供风量, m^3/s 。

通过监测浓度得到各洞室需风量后,计算各洞室调节风量所需的风机频率,若A、B试验大厅需风量变化为 $Q'_{A左}$ 、 $Q'_{B左}$,基于式(10),可得各洞室满足调节后风量对应的频率为:

$$f_{A左} = Q'_{A左} / 0.189, f_{B左} = Q'_{B左} / 0.285 \quad (18)$$

根据表3可将轴流风机、射流风机按照电源工作频率划分成7个挡位,不同频率下对应的功率、风量以及风速见表4。取式(18)计算结果最大值作为风机运行频率,与表4中风机挡位匹配并向上取值,例如计算结果为23 Hz,则将挡位调至2档,最后根据风机运行频率计算出各分支的分配风量。

表4 风机档位与频率对应关系

Table 4 The corresponding relationship between fan gear and frequency

频率 f/Hz	档位	功率 P/kW	流量 $Q/$ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
20	1	7.04	13.2	14.7
25	2	13.8	16.6	18.3
30	3	23.8	19.9	21.9
35	4	37.7	23.2	25.4
40	5	56.3	26.5	29
45	6	80.2	29.8	33
50	7	110	33.1	36.6

根据质量守恒定律,试验大厅中轴流风机供风量等于服务隧道中排出量。因此,利用式(16)中各分支风量分配结果,可推算出射流风机排风量,以及得到服务隧道中断面平均回风风速、通风阻力。根据式(13),可计算出射流风机克服通风阻力所需风速,从而指导射流风机变频。

对服务隧道A、B中射流风机,将洞室参数、风机参数、阻力系数、洞室风量代入式(13),化简可

得射流风机风速计算式。

通过理论计算,得到左右工区轴流风机对应的运行频率分别为42.3 Hz、44.2 Hz,匹配表4,选取挡位6作为风机目标挡位,即电源输入频率为45 Hz,流量为 $29.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

$$v_{j(A)}^2 - \frac{0.57Q}{46.6} v_{j(A)} = 0.15Q^2$$

$$v_{j(B)}^2 - \frac{0.43Q}{46.6} v_{j(B)} = 0.147Q^2 \quad (19)$$

结合式(19),服务隧道A、B中射流风机克服洞室通风阻力最小运行风速为:

$$v_{j(A)}^2 - \frac{0.57 \cdot 29.8}{46.6} v_{j(A)} = 0.15 \cdot 29.8^2$$

$$\Rightarrow v_{j(A)} = 11.7 (\text{m/s})$$

$$v_{j(B)}^2 - \frac{0.43 \cdot 29.8}{46.6} v_{j(B)} = 0.147 \cdot 29.8^2$$

$$\Rightarrow v_{j(B)} = 11.6 (\text{m/s}) \quad (20)$$

将计算结果匹配表3,服务隧道射流风机输入电源功率调节至20 Hz。按照上述变频结果对原通风方案风机进行相应设置,并进行数值模拟验证。

3 数值模拟

3.1 模型建立

本文利用流体计算软件Fluent构建洞室模型,如图3所示。设置洞室风管入口为速度边界,出口空气域设置为压力出口。由于洞室壁面初期施工一般需喷射混凝土,其粗糙高度受施工质量影响较大,因此设置数值模型中洞室壁面粗糙高度为0.2 m。风管采用柔性风管,进口风量为 $33.1 \text{ m}^3/\text{s}$,设置其粗糙高度为0.001 m。

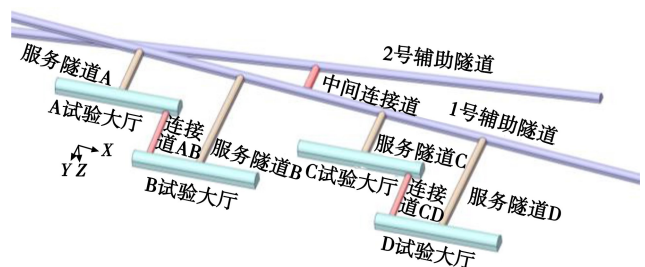


图3 地下洞室数值模型

Fig. 3 Numerical model of underground caverns

试验厅壁面设置质量流入口与射入源分别模拟喷漆排放的苯与粉尘。其中,采用组份运输模型对挥发性苯进行模拟,采用多相流模型对粉尘进行模拟,苯与粉尘的产生速率分别为 15.6 mg/s 、 2.6 mg/s 。由于实际中污染物颗粒流动受重力作

用,为提高模拟的准确性且最大程度接近真实场景,在操作条件窗口中勾选 Gravity 激活重力作用,同时对两种污染物考虑重力的影响。洞室模型中每隔 1 m 布设 1 个横断面,将各个横断面的数据绘成数据图,分析不同时间下洞室内苯和粉尘的浓度分布情况。

3.2 网格敏感性验证

为验证网格尺寸对数值模拟的影响,采用不同网格尺寸对模型进行网格划分,分析计算结果以确定最优网格。通过控制不同面网格的最大尺寸划分 4 种网格,其最大尺寸分别为 0.4 m、0.5 m、0.6 m、0.7 m,对应的网格名称和数量分别为网格 A (1400908)、网格 B (1248583)、网格 C (1134209)、网格 D (1062035)。对上述 4 种网格进行模拟,分析距工作面不同距离处洞室横断面上的平均风速,模拟结果如图 4 所示。

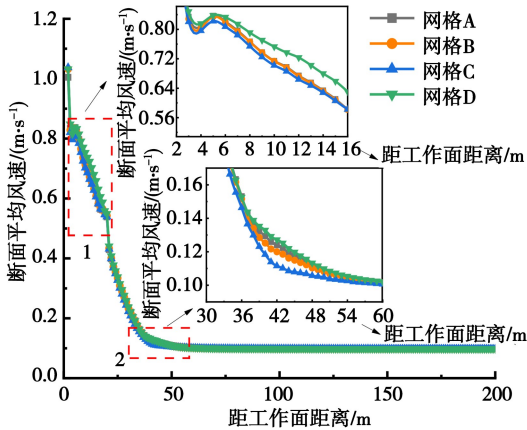


图 4 网格敏感性分析

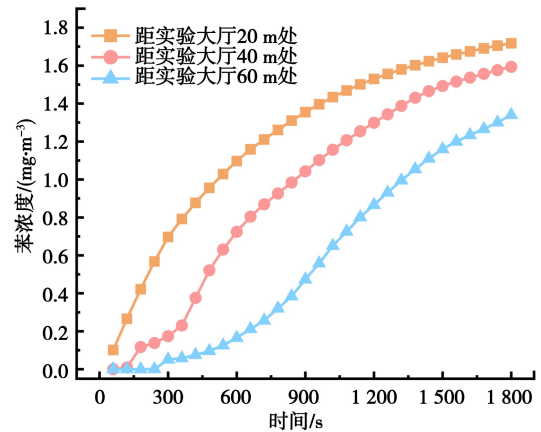
Fig. 4 Grid sensitivity analysis

可以发现,在 4 种不同网格下,各横断面的风速差异较小,且风速变化趋势一致。由于图中数据密集,为进一步确定网格间的差异,取曲线中标号 1、2 位置进行放大分析,标号 1 处为距工作面 2~16 m 各断面的平均风速,网格 D 在这段区域较其余网格模拟结果偏高;标号 2 处为距工作面 32~60 m 各断面的平均风速,网格 C 的模拟均低于其他三种网格,且在距工作面 36~44 m 区域有明显的差异。因此,综合数值精度与计算效率考虑,选取最大尺寸为 0.5 m 网格 B 作为后续数值模拟的划分方法。

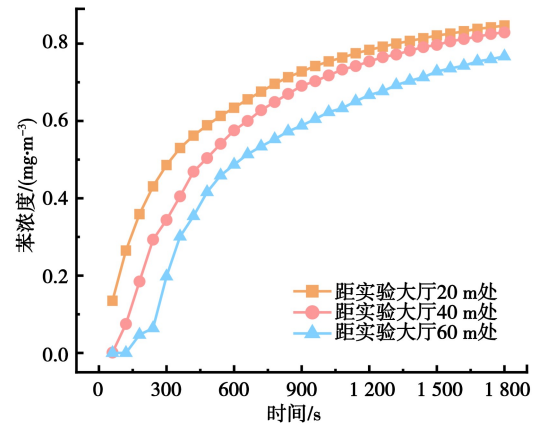
3.3 结果分析

为验证变频方案的有效性与可行性,对比分析通风 30 min 内距地下洞室 A、B 试验大厅 20 m、40 m、60 m 壁面处苯、粉尘浓度的变化趋势。

变频前各试验大厅苯与粉尘浓度随通风时间变化曲线如图 5、图 6 所示。



(a) A 实验大厅左侧



(b) B 实验大厅左侧

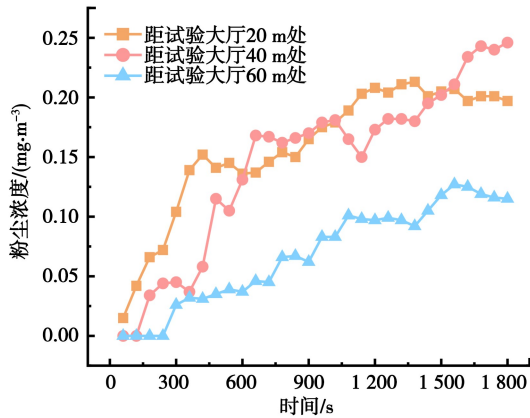
图 5 变频前试验大厅苯浓度曲线

Fig. 5 Pollutant concentration curves of the experiment hall before frequency conversion

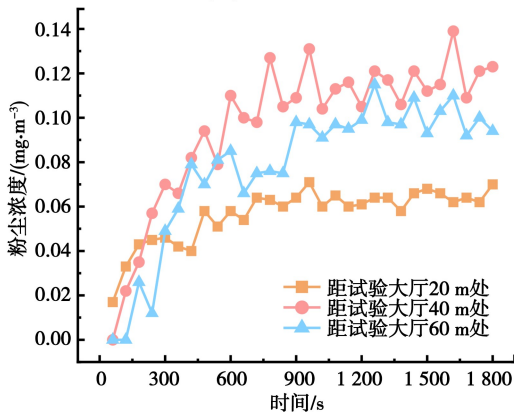
随着通风时间的增加,试验大厅中苯浓度逐渐升高,增幅逐渐减小,曲线上升趋势变缓。说明在持续通风下,试验大厅内苯的产生速率与风流带动苯排出速率逐渐相等,最终使得试验大厅苯浓度保持稳定。越靠近风管出口的断面苯浓度越容易达到稳定,例如距 A 试验大厅 20 m 处断面的苯含量在通风 1 800 s 时接近稳定,其浓度为 1.7 mg/m^3 ,而其他断面远离风管出口,断面风速降低,处于发展阶段。B 试验大厅的单侧供风量大,排污效果更好,各断面苯浓度差异小,更快发展到稳定阶段。

粉尘浓度变化规律与苯类似,趋势为先增加后维持在一定水平波动。各试验大厅断面粉尘发展稳定时最大浓度约为 0.24 mg/m^3 ,远小于浓度限值。

综上所述,在当前通风方案下,通过数值模拟分析苯浓度、粉尘浓度的发展趋势和分布规律,该地下洞室污染物浓度均小于浓度限值,满足环境指标,验证了通风设计方法的可行性。



(a) A试验大厅左侧



(b) B试验大厅左侧

图6 变频前试验大厅粉尘浓度曲线

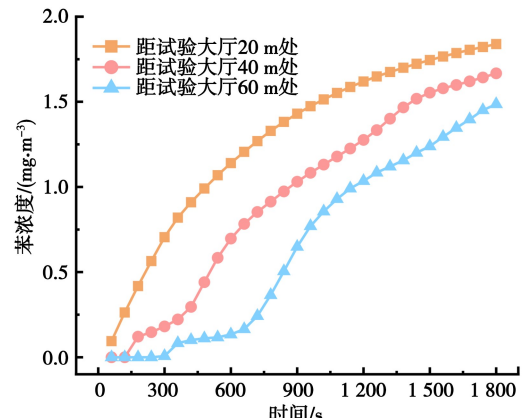
Fig. 6 Pollutant concentration curves of the experiment hall before frequency conversion

变频后各试验大厅监测面上苯与粉尘浓度随通风时间的变化曲线如图7、图8所示。

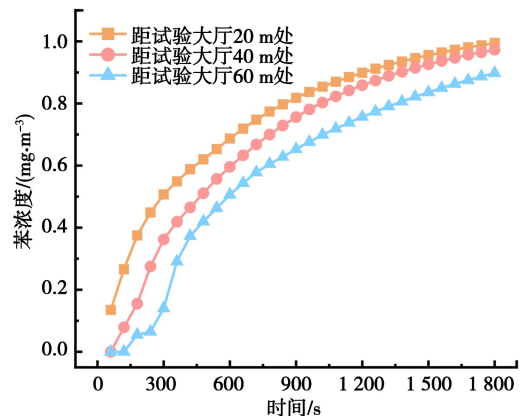
以A、B试验大厅左侧为例,可以看出,二者变化趋势和风机未变频时保持一致。苯浓度逐渐升高,增幅逐渐降低,最后保持稳定。距A试验大厅20 m处断面粉尘浓度增长速率持续降低,其他断面远离出风口,浓度增长速率并非持续降低,而是呈波动趋势;B试验大厅单侧供风量大,所有断面均能保持同步发展趋势。

通风1800 s时,变频后由于供风量的降低,导致各试验大厅中苯浓度升高,各试验大厅监测面上苯浓度最大值分别为 1.868 mg/m^3 、 1.005 mg/m^3 ,较未变频时略有上涨,但依旧低于限值。粉尘的浓度先增加后维持在一定水平波动。由于焊烟颗粒本身的物理性质,即使改变供风量,40 m处断面依然保持较高的粉尘浓度,B试验大厅单侧供风量更高,粉尘易在后方断面聚集。A、B试验大厅断面粉尘最大浓度分别为 0.255 mg/m^3 、 0.14 mg/m^3 ,略高于变频前粉尘浓度。

取1.7m高度断面,对比各试验大厅风机变频



(a) A试验大厅左侧



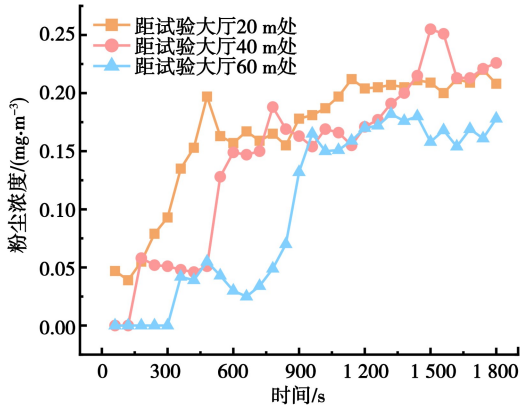
(b) B试验大厅左侧

图7 变频后试验大厅苯浓度曲线

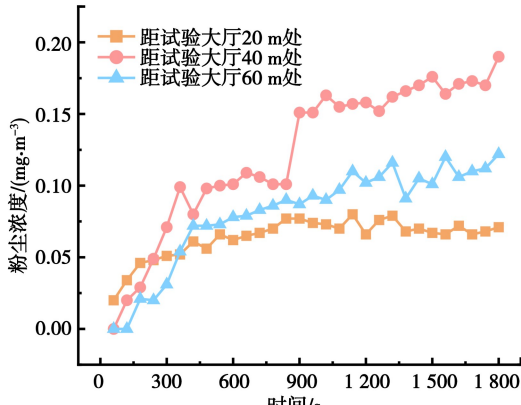
Fig. 7 Pollutant concentration distribution curves of experiment hall after frequency conversion

前后断面上苯、粉尘浓度最大值,如图9所示。图9(a)为试验大厅苯浓度最大值,可以发现,各洞室呼吸高度处,变频前苯浓度均小于变频后。A、C试验大厅变频前后浓度均大于 2 mg/m^3 ,增量分别为 0.17 mg/m^3 、 0.129 mg/m^3 ;B、D试验大厅变频前后浓度均大于 1 mg/m^3 ,增量分别为 0.366 mg/m^3 、 0.28 mg/m^3 ,最大增幅为31.1%。图9(b)为试验大厅粉尘浓度最大值。粉尘浓度变频后较变频前在各洞室出现明显升高,A、C试验大厅变频前后浓度均大于 0.8 mg/m^3 ,增量分别为 0.099 mg/m^3 、 0.095 mg/m^3 ;B、D试验大厅变频前后浓度均大于 0.5 mg/m^3 ,增量分别为 0.131 mg/m^3 、 0.08 mg/m^3 ,最大增幅为24.6%。从上述数据可知,变频后苯、粉尘浓度增量在可接受范围内,浓度依旧低于限值。

综上所述,按照理论计算结果降低风机电源输入频率时,各试验大厅供风量减小,射流风机射流风速降低,使得各试验大厅、服务隧道苯和粉尘浓度升高,但变频后污染物浓度仍小于限值标准,说明调节风机运行频率,仍可以保证地下洞室施



(a) A试验大厅左侧



(b) B试验大厅左侧

图 8 变频后试验大厅粉尘浓度曲线

Fig. 8 Pollutant concentration curves of the experiment hall after frequency conversion

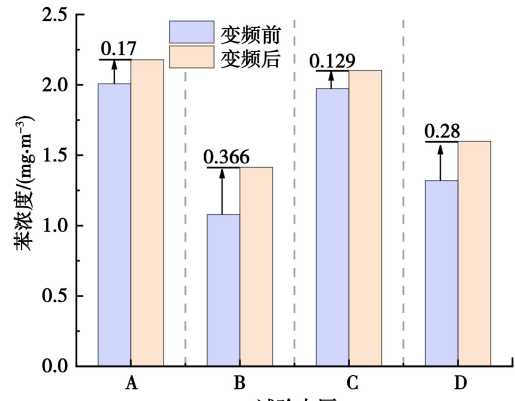
工环境满足规范要求,验证了变频计算方法的可行性。

4 现场实测与变频有效性验证

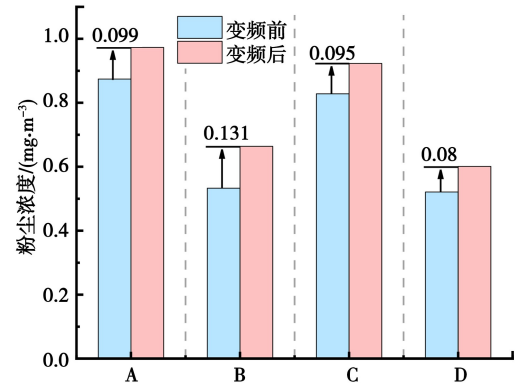
4.1 系统搭建与测点布置

为了准确了解洞室各施工区域的空气质量并实现动态调控,建立了施工动态调控系统。其中,系统硬件包括各环境参数传感器、无线通信模块、主板 CPU、电源、接线盒、变频器等。软件为通风控制平台,用于传递、储存、处理数据等功能。系统结构如图 10 所示。

采用 GF-201-TVOC 检测仪与粉尘检测仪作为空气质量传感器进行数据采集,检测仪测量范围为 0~10 ppm,精度 $\leq \pm 3\%$ (F.S),采集设备如图 11 所示。并将监测数据通过无线通信模块上传至云平台处理,计算出洞室不同位置处风机运行频率,再通过无线通信模块将风机频率信号反馈给变频器,调节风机转速以实现变频调风。系统还具有自动运行和人工控制运行自由切换的功能,优化并完善了地下洞室施工的通风管理,以达到节能的目的。



(a) 苯浓度



(b) 粉尘浓度

图 9 变频前后试验大厅污染物浓度对比

Fig. 9 Comparison of pollutant concentration in the experiment hall before and after frequency conversion

采集设备布设位置如图 12 所示。

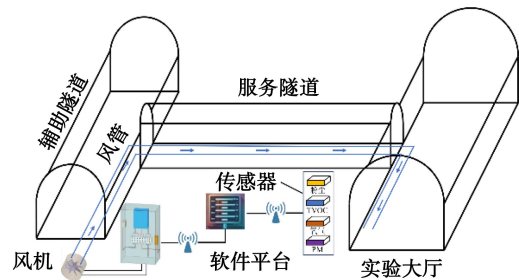


图 10 地下洞室施工通风自动控制结构

Fig. 10 Construction ventilation automatic control structure of underground cavern

4.2 变频有效性现场验证

在施工通风动态调控系统使用过程中,选择某天上午施工过程中洞室环境监测数据以及风机运行数据进行分析,地下洞室各环境质量监测点苯、粉尘浓度变化曲线如图 13 所示。

图 13(a)为苯监测曲线,可以发现,8:40 时,4 号测点和 8 号测点苯浓度陡然升高,9:50 时苯浓度达到 4.821 mg/m^3 ,超过浓度阈值,2 号门轴流风机增大电源输入频率,C、D 试验大厅供风量增加,



图 11 空气质量采集设备

Fig. 11 Air quality acquisition equipment

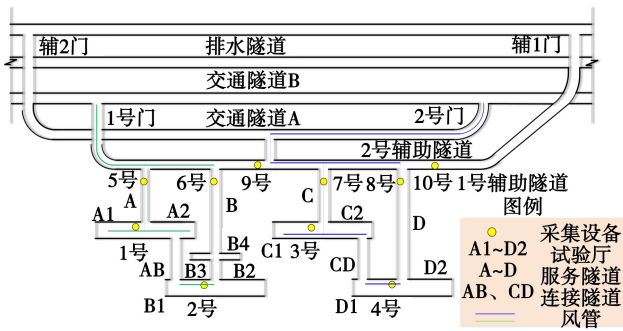


图 12 空气质量采集设备布设位置

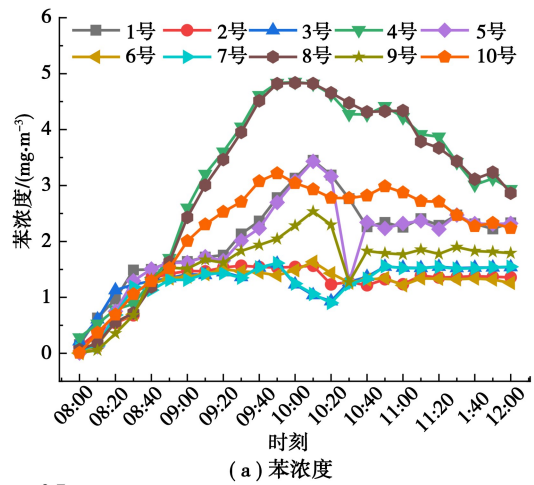
Fig. 12 Arrangement location of air quality acquisition equipments

苯浓度得到控制,30 min 后,D 试验大厅苯浓度开始下降,此时浓度为 4.656 mg/m^3 ,低于阈值,此时轴流风机自动调节至基础档位运行,即电源输入频率调至 45 Hz。

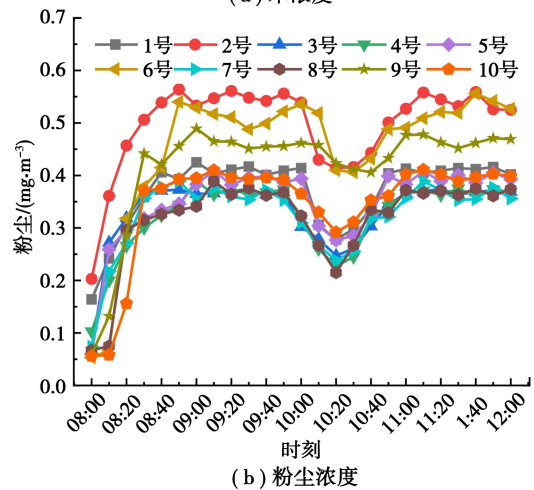
图 13(b)为各测点粉尘监测曲线,各洞室中粉尘含量随着施工进程升高,并逐渐达到稳定。在 10:00 左右,由于风机变频,供风量增加,使得各洞室粉尘含量降低,当风机调回原来运行频率后,由于洞内粉尘释放量未变,粉尘含量又回升至原有平衡点,粉尘最大浓度保持在 0.559 mg/m^3 。

上述监测时间段下洞室各位置风机运行频率及节电率,如图 14 所示。图 14(a)显示,试验大厅中污染物浓度未超过阈值时,轴流风机和 1 号辅助隧道射流风机保持 45 Hz 运行。9:50 时,D 试验大厅苯浓度超过阈值,2 号门轴流风机调至 50 Hz 运行。各服务隧道射流风机常保持 20 Hz 运转满足洞室升压排风要求。

图 14(b)为各类风机的平均节电率。施工期



(a) 苯浓度



(b) 粉尘浓度

图 13 各测点污染物浓度监测曲线

Fig. 13 Monitoring curves of pollutant concentration at each measuring point

大部分时间内,轴流风机和射流风机分别保持 25%左右和 60%以上的节电率。现场结果表明,施工通风动态调控系统可实现洞室自动监测环境参数、处理数据、计算风机频率、下发指令等功能,以实现复杂地下洞室风量调控。在保证地下洞室施工期通风需求的同时,减少人员操作风机的风险,节约能源并降低施工成本。

5 结论

(1) 试验大厅各断面中苯和粉尘浓度呈现先增加后平缓的趋势,污染物产生量和排出量逐渐守恒。人员呼吸高度处,试验大厅苯和粉尘峰值浓度分别为 1.942 mg/m^3 , 0.874 mg/m^3 ,均小于二者浓度限值,通风方案合理。

(2) 基于地下洞室分区风机频率计算方法进行通风变频策略设计。风机变频后,人员呼吸高度处,两类污染物最大增量分别为 0.366 mg/m^3 , 0.131 mg/m^3 ,峰值浓度分别为 2.178 mg/m^3 , 0.973 mg/m^3 ,均在浓度限值范围内,验证了变频

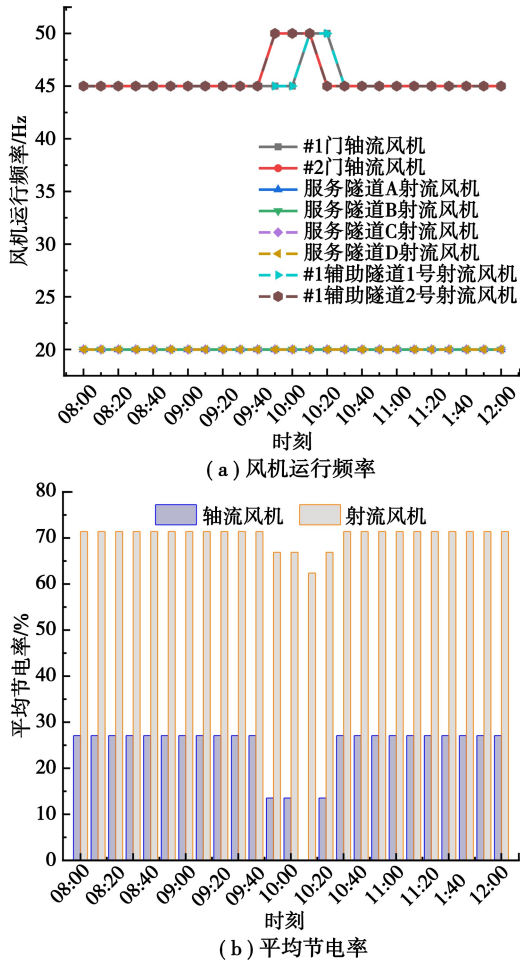


图14 风机运行频率及平均节电率

Fig. 14 Frequency and average power saving rate of fan operation

策略的可行性。

(3) 搭建施工通风动态调控系统,结合环境监测数据,实现了地下洞室施工期污染物浓度的自动调节。现场结果表明,此施工通风动态调控策略可有效控制污染物浓度,轴流风机和射流风机节电率分别达25%左右和60%以上。

参考文献 (References)

- [1] Bakke B, Ulvestad B, Stewart P, et al. Effects of blasting fumes on exposure and short-term lung function changes in tunnel construction workers [J]. Scand J Work Environ Health, 2001, 27(4): 250-257.
- [2] Bakke B, Ulvestad B, Stewart P, et al. Cumulative exposure to dust and gases as determinants of lung function decline in tunnel construction workers [J]. Occup Environ Med, 2004, 61(3): 262-269.
- [3] 孙会想,汪海平. 特大型地下洞室群施工期通风技术研究及应用[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(6): 187-195. (Sun Huixiang, Wang Haiping. Research and application of the construction ventilation techniques for large underground cavern group[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(6): 187-195. (in Chinese))
- [4] 郑金龙,蔚艳庆,杨枫. 高海拔雀儿山隧道建设关键技术创新与实践[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(7): 1088-1097. (Zheng Jinlong, Wei Yanqing, Yang Feng. Tunneling at high altitude: Technology innovations and practices in Que'ershan tunnel [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(7): 1088-1097. (in Chinese))
- [5] Liu R, He Y, Zhao Y F, et al. Tunnel construction ventilation frequency-control based on radial basis function neural network [J]. Automation in Construction, 2020, 118: 103293.
- [6] 任涛,廖勇,陈结,等. 基于RBF神经网络的隧道施工自适应控制通风系统[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(增1): 404-411. (Ren Tao, Liao Yong, Chen Jie, et al. Self-adaptive control ventilation system for tunnel construction based on RBF neural network [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(Supp. 1): 404-411. (in Chinese))
- [7] Wang Y M, Zhou C X, Zhao Q T, et al. Ventilation control of road tunnels towards disturbance suppression[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 1-13.
- [8] An R N, Lin P, Li Z C, et al. Intelligent ventilation-on-demand control system for the construction of underground tunnel complex[J]. Journal of Intelligent Construction, 2024, 2(2): 9180032.
- [9] 邵春,樊纯坛,梁庆国,等. 高寒特长铁路隧道施工机械化及智能通风技术探究[J]. 铁道标准设计, 2025(4):166-174. (Shao Chun, Fan Chuntan, Liang Qingguo, et al. Research on construction mechanization and intelligent ventilation technology of arctic-alpine and extra-long railway tunnel[J]. Railway Standard Design, 2025(4):166-174. (in Chinese))
- [10] Wu K, Yang Q M, Kang C, et al. Adaptive critic design based control of tunnel ventilation system with variable jet speed [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2017, 86: 269-278.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道施工技术规范(JTG/T 3660-2020)[S]. 北京:人民交通出版社, 2020. (Ministry of Communications of the People's Republic of China. Technical specifications for construction of highway tunnel [S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese))
- [12] 孙一坚,沈恒根. 工业通风[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010. (Sun Yijian, Shen Henggen. Industrial ventilation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))

- Environmental Engineering, 2019, 37 (5): 129-133. (in Chinese))
- [19] 夏凤毅, 王馨, 叶丹, 等. 杭州地铁1号线颗粒物污染水平监测与分析[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(1): 204-210. (Xia Fengyi, Wang Xin, Ye Dan, et al. Monitoring and analysis of particulate matter pollution level in hangzhou metro line 1 [J]. Journal of Safety and Environmental Studies, 2023, 23 (1): 204-210. (in Chinese))
- [20] 潘嵩, 王洪伟, 王新如, 等. 北京某地铁车站细颗粒物分布特性研究[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(4): 415-421. (Pan Song, Wang Hongwei, Wang Xinru, et al. Characteristics of PM2.5 distribution in a subway station in Beijing [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(4): 415-421. (in Chinese))
- [21] Otuyo M K, Mohd Nadzir M S, Latif M T, et al. In-train particulate matter (PM10 and PM2.5) concentrations: Level, source, composition, mitigation measures and health risk effect-A systematic literature review [J]. Indoor and Built Environment, 2023, 32(3): 460-493.
- [22] 刘杰, 于孔飞, 徐琳, 等. 城市道路隧道晚高峰环境参数时空差异性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(1): 337-343. (Liu Jie, Yu Kongfei, Xu Lin, et al. Spatio-temporal difference analysis on environmental parameters inside an urban road tunnel during the evening rush hour [J]. Chinese Journal of
- Underground Space and Engineering, 2024, 20(1): 337-343. (in Chinese))
- [23] 高月芬, 韩帅, 刘兆. 地铁屏蔽门系统站台空气品质数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增1): 383-388. (Gao Yuefen, Han Shuai, Liu Zhao. Numerical simulation analysis on platform air quality of subway screen door system [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16 (Supp. 1): 383-388. (in Chinese))
- [24] 王薇, 张蕾, 夏斯涵, 等. 地铁入口空间布局对室内空气质量的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(2): 677-689. (Wang Wei, Zhang Lei, Xia Sihan, et al. Study on the Influence of Subway Entrance Space Layout on Indoor Air Quality [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20 (2) : 677-689. (in Chinese))
- [25] 赵敬德, 王金龙, 严国庆, 等. 城市轨道交通环控系统颗粒物浓度的实测研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(4): 342-347. (Zhao Jingde, Wang Jinlong, Yan Guoqing, et al. Measuring results of particle concentration in environmental control system of urban rail transit [J]. Journal of Safety and Environment, 2016 (4) : 342-347. (in Chinese))
- [26] 刘千金. 城市拥堵状态下交通污染及其健康经济损失[D]. 西安: 长安大学, 2021 (Liu Qianjin. The health economic loss of traffic pollution under urban congestion [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese))

(上接第741页)

- [13] 杨立新. 现代隧道施工通风技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012. (Yang Lixin. Modern tunneling ventilation technology [M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese))
- [14] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 工作场所所有害因素职业接触限值第1部分: 化学有害因素: GBZ 2.1-2019 [S]. 成都: 人民卫生出版社, 2019. (National Health Commission of the People's Republic of China. Occupational exposure limits for hazardous agents in the workplace part 1: Chemical hazardous agents: GBZ 2.1-2019[S]. Chengdu: People's Medical Publishing House, 2019. (in Chinese))
- [15] 邢荣军, 徐湃, 蒋树屏, 等. 交通隧道远程变频通风技术研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2017, 36(4): 18-23. (Xing Rongjun, Xu Pai, Jiang Shuping, et al. Ventilation technology of long-distance inverter in traffic tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2017, 36(4): 18-23. (in Chinese))
- [16] 胡利明, 蒋曙光, 韩靖, 等. 风机变频稀释超限瓦斯的自动控制系统设计[J]. 煤矿机械, 2015, 36(2): 29-31. (Hu Liming, Jiang Shuguang, Han Jing, et al. Design of automatic controlling system to dilute over-limit concentration gas by frequency conversion of fan [J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(2): 29-31. (in Chinese))